

多模卫星导航星载终端仿真平台设计

高万里, 赵 诣, 李向红, 刘 磊, 崔 鹤

(航天恒星科技有限公司, 北京 100086)

摘要: 高分辨率卫星的大成像幅宽、多成像模式、多时空协调、全天候、全天时对地观测需求对卫星高精度高稳定度姿态控制技术、高精度卫星定轨技术提出了极高的要求; 为确保卫星定轨精度指标达到设计要求, 并提高对卫星定轨技术的分析能力, 提出了搭建多模式精密定轨半物理仿真验证系统, 在地面用卫星导航星载终端仿真平台模拟各种星载导航设备; 提前开展仿真验证工作, 减少星载导航设备在轨飞行风险, 提高可靠性; 提出一种多模卫星导航定轨星载终端仿真平台的设计方法, 整机设计包括导航板、接口板; 实测表明, 该仿真平台重约 1.5 kg, 尺寸 220 mm×140 mm×70 mm, 功耗约 20 W, 兼容处理 GPS L1/L2、BD2 B1/B2/B3 等信号, 模拟星载导航设备在高动态条件下定位、定轨、授时的性能, 提供精密定轨所需要数据, 为星载导航设备精密定轨仿真验证提供了新的思路。

关键词: 精密定轨; 仿真验证平台; 星载导航终端

Design of Multimode Satellite Navigation Space borne Terminal Simulation Platform

Gao Wanli¹, Zhao Yi¹, Li Xianghong¹, Liu Lei¹, Cui He¹

(Space Star Technology Co., Ltd, Beijing 100086, China)

Abstract: The large imaging width, multi-imaging mode, multi-time and space coordination, all-weather and all-day requirements of earth observation satellite, which proposed a very high claim of high-precision, high-stability attitude control technology, high-precision orbit determination technology. In order to ensure that the satellite orbit determination accuracy meet the design requirements and improve the ability of satellite orbit analysis technology, proposed to build multi-mode precision orbit semi-physical simulation verification system. here is used on the ground to simulate varies space borne navigation equipment to reduce risk of space borne navigation equipment and improve reliability. This article propose a design method of multi-mode Precision orbit semi-physical simulation verification system. The platform includes a navigation board and an interface board. The simulation platform weighs about 1.5 kg, size 220 mmx140 mmx70 mm, power consumption of about 20W, compatible with GPS L1/L2, BD2 B1/B2/B3. This platform simulate space borne navigation equipment's performance of orbit determination, positioning, and timing, provides data for high-precision orbit determination. This article provides a new way of simulation and verification for space borne navigation equipment.

Keywords: high-precision orbit determination, simulation and verification platform, space borne navigation equipment

0 引言

近年来, 随着我国国民经济的增长和民用各业务领域应用的迫切需求, 高分辨率成像卫星遥感数据需求呈逐年增长的趋势^[1]。高分辨率成像遥感数据广泛应用在海洋、水土监测、气象灾害、环境等领域, 为我国经济建设做出了较大的贡献。

随着我国海洋二号、高分三号等多颗高分辨率对地观测卫星的发射, 我国高分辨率对地观测技术取得了较大的发展, 为了满足用户的多时空协调、全天候、全天时对地观测需求。高分卫星需要具有高分辨率、大成像幅宽、多成像模式, 具备传统的条带成像模式和扫描成像模式, 以及面向海洋应用的波成像模式和全球观测成像模式, 可满

足不同用户对不同目标成像的需求。这对卫星高精度高稳定度姿态控制技术、高精度卫星定轨技术提出了极高的要求^[2]。

为确保卫星定轨精度指标达到设计要求, 并提高对卫星定轨技术的分析能力, 需要在地面搭建多模式精密定轨半物理仿真验证系统, 该系统由信号仿真系统、多模卫星导航星载终端仿真平台、事后精密定轨数据处理软件^[3]组成。信号仿真系统用于生成高动态模拟信号; 仿真平台作为星载设备的模拟器, 用于分析和仿真星载设备的接收性能和数据处理能力, 模拟星载设备在高动态条件下定位、定轨、授时的性能^[4], 可在地面对星载多模导航接收进行全面仿真和评估, 事后精密定轨处理软件验证卫星精密定轨的实际能力, 完成高分卫星精密定轨能力的仿真^[5]。

本文结合多模式精密定轨半物理仿真验证技术的需求, 在此基础上提出了一种多模卫星导航星载终端仿真平台的设计方法。在介绍整个接收机架构的基础上, 对每个模块

收稿日期:2018-09-11; 修回日期:2018-10-11。

作者简介:高万里(1984-),男,河南周口人,副总工程师,主要从事卫星导航技术方向的研究。

的组成和功能进行了概述,并搭建测试环境,对仿真平台进行功能测试,对仿真平台数据进行了分析,确认了仿真平台各项技术指标符合要求。

1 多模卫星导航星载终端仿真平台指标分解

根据多模式精密定轨半物理仿真验证技术的需求特点和功能需求,得到多模卫星导航星载终端仿真平台指标如表 1 所示。

表 1 多模卫星导航星载终端仿真平台指标分解

指标名称	研制目标
工作频率	L1/L2、B1/B2/B3
信号处理通道	60
工作模式	单 GPS、BD2 模式 GPS 与 BD2 组合模式
灵敏度	捕获:优于 -160 dBW; 跟踪:优于 -162 dBW
授时精度	优于 ±0.1 us
伪距测量精度	优于 50 cm
定位、定轨精度	水平:优于 8 m 高程:优于 10 m
实时测速精度	优于 0.2 m/s
通道一致性时延	≤0.1 ns
数据更新率	5 Hz
重量	≤1.5 kg
体积	≤220 mm×140 mm×70 mm
功耗	≤20 W

2 多模卫星导航星载终端仿真平台总体设计

多模卫星导航星载终端仿真平台由导航板和接口板组成,导航板主要完成 GPS L1/L2 和 BD2 B1/B2/B3 射频信号的滤波、放大、下变频并经过 A/D 转换后传输至 FPGA^[4],通过 DSP 处理器与 FPGA 协同工作,完成导航信号的伪距、载波相位和信噪比信息的获取,解算出定位、时间信息,并将这些信息传输至接口板。接口板主要包括内部通信模块,电源供配电管理模块,外部接口模块等。内部通信模块负责接收导航板传输过来的定位、时间等信息和发送上注和控制信息给导航板。接口模块将接收到的相关将定位数据、状态遥测、原始测量数据等按照一定的格式进行打包输出给外部总线。电源管理模块主要完成多模卫星导航星载终端仿真平台的供配电管理功能。多模卫星仿真平台具有 10 M/100 M 自适应以太网、RS232、RS422、CAN 总线、USB 接口、1553B 总线等多种接口通信功能。

2.1 导航板设计

2.1.1 导航板电路设计

根据导航板的功能、性能需求,选用 FPGA 来完成对 ADC 输出的中频数字信号进行数字下变频、低通滤波、存储,对得到的基带数据进行相关运算,将相关值依次传给 DSP,通过数据处理完成信号捕获与信号跟踪,提供给 DSP 用于定位解算和定轨运算,同时完成导航信号的码伪距、载波相位和信噪比信息的获取。根据对性能指标需求的评价,导航板选用 XC7K 系列实现 FPGA 功能,该系列芯片

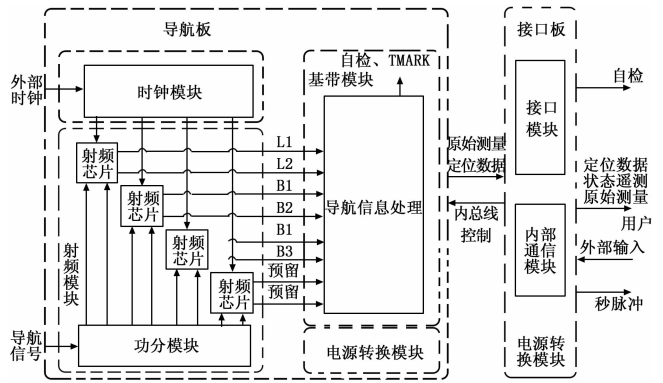


图 1 星载终端仿真平台架构框图

为 XILINX 公司 Kintex 7 系列产品,可用资源满足需求,选用该器件具有先进性,可在近几年的产品设计中持续使用。选用 DSP 来完成复杂度较高的导航定位解算和定轨运算,码伪距、载波相位和信噪比信息获取,算法中含大量积分累加迭代运算^[6]。根据对需求的评价,导航板选用 TMS320C6XX 系列实现 DSP 处理器功能。

导航板 FPGA 工作需要 1.0 V、1.8 V 和 3.3 V 3 种电源电压,DSP 工作时需要 1.4 V 和 3.3 V 两种电压。FPGA 和 DSP 的上电需要进行时序控制,上电顺序以 DSP 先上电工作然后其它外设后上电、FPGA 与 DSP 核电压先上电,外围电压后上电的策略。通过上电顺序控制,保证导航板上电加载的可靠性,避免出现加载不起来,加载过程中电流异常等问题。电路设计选用 LINEAR 公司的多轨道电源芯片 LTM4615、LTM4616 来给单板供电,LTM4615 双路输出 DC/DC,一路输出 LDO,LTM4616 双路输出 DC/DC,输出电压可调,满足导航板各类工作电压及电流需求。DC/DC 的 PGOOD 输出管脚作为使能控制引脚,能够控制其它电源上电时序。

多模卫星导航星载用户终端仿真平台导航板的系统框图如图 2 所示。

多模卫星导航星载用户终端仿真平台导航板对时钟要求比较高,平台主时钟采用 10 M 温补晶振,通过功分器输出 5 路 10 MHz 时钟,其中 4 路用于射频模块 XN1XX 参考时钟,另外一路 10 MHz 时钟通过频率综合器进行倍频,输出给 XN1XX 作为采样时钟和 FPGA 的主时钟。平台 10 M 主时钟晶振的选用温补晶振可以适应多种环境温度变化,避免外界温度出现变化时因时钟不稳定导致仿真平台出现掉星、信噪比下降、非定位等异常。同时电路设计上预留时钟切换电路,可以外接高稳定时钟,提供更高精度的定位和定轨结果,适应不同的应用场合。时钟电路设计通过采用功分,采用频率综合的方法,保证所有射频芯片和 FPGA 能够做到时钟同源,时钟电路同步,保证了后面相关器的可靠稳定的工作。

射频模块将从天线接收的 GNSS 射频信号通过 LNA 放大,通过功分器将 4 路射频信号分别送入至预选频滤波器,将 L1、L2、B1、B2、B3 频点信号分别滤出,滤出的信号

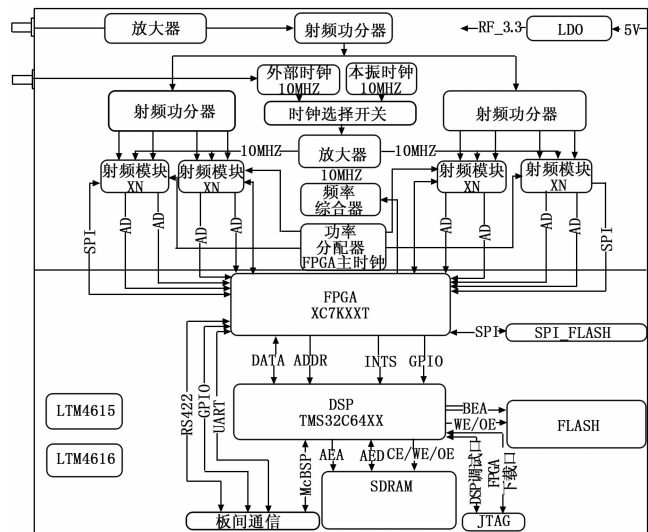


图 2 导航板系统架构框图

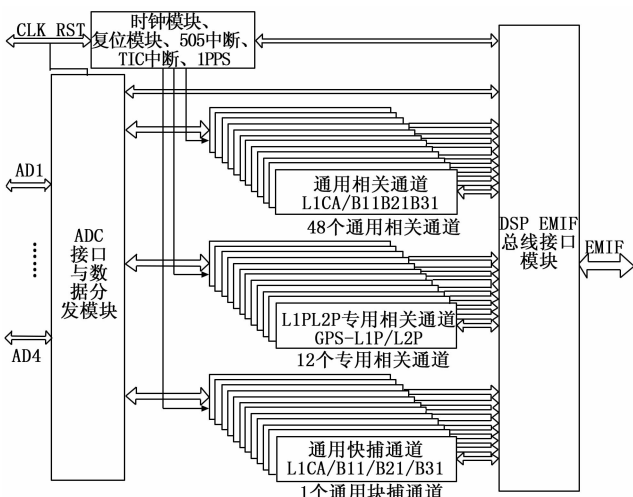


图 3 基带处理 FPGA 软件的逻辑结构图

输入至射频芯片 XN1XX，每个射频芯片完成两路射频信号的下变频和 AD 转换。第一级 LNA 的选用对接收机的灵敏度具有很关键的作用，通过选用高增益、低噪声系数的第一级 LNA，同时对整个链路增益进行合理的设计，保证仿真平台具有较好的灵敏度。XN1XX 是专为 RNSS 测量型接收机开发的双通道射频电路，集成混频器、中频低通滤波器、可变增益放大器、频率合成器以及模数转换器。集成双路下变频通道，四位模数转换器，支持多种 RNSS 导航协议。通过 SPI 接口可以方便的进行本振及各种参数配置。XN1XX 输出的数字中频信号传输到基带处理模块进行处理。在 PCB 设计上保证时钟分配器输出到各个 XN1XX 芯片的采样时钟和到 FPGA 的时钟在走线上等长，保证各路数据的同步性。

2.1.2 导航板 FPGA 设计

多模卫星导航星载用户终端仿真平台 FPGA 软件主要完成通用相关通道和通用快捕通道的功能。通用相关通道完成 GPS-L1CA 码及 BD2-B1I/B2I/B3I 码基带信号的解调和扩频功能，输出相关累加量和测量量。相关通道具备通用相关处理能力，任意一个相关通道均可被配置成 L1CA 或 B1/B2/B3 相关器，任意一个相关通道均可以被配置成信号跟踪通道、或噪声统计通道。通用相关通道由本地载波发生器、本地伪码发生器、数字混频器、相关积分累加器组成^[7-8]。通用相关通道设计独立且实现方式完全一致。

导航星快速捕获模块主要完成卫星的快速捕获，可以快速完成 GPS-L1CA 码及 BD2-B1I/B2I/B3I 码的捕获工作，通过获取的多普勒信息和码相位信息，辅助任意一个通用相关通道。快捕时钟使能完成卫星快速捕获模块的工作时钟使能控制，DSP 可根据需要对快速捕获模块的工作时钟进行打开或者关闭，该功能使用 FPGA 内部专用的时钟 BUFFER 来控制快速捕获工作时钟^[9-10]。

L1PL2P 专用相关通道：L1PL2P 专用相关通道完成 GPS-L1PL2P 码基带信号的解调和扩频功能，输出相关累

加量和测量量。任意一个相关通道均可以被配置成信号跟踪通道或噪声通道。相关通道由本地载波发生器、本地伪码发生器、数字混频器、相关积分累加器组成。专用相关通道设计独立且实现方式完全一致。

2.1.3 导航板 DSP 程序设计

导航板 DSP 软件主要完成 GPS/BD2 导航信号的捕获、跟踪，数据解调以及绝对定位解算、定轨等关键功能。以及 FPGA 状态监控功能、SRAM 运行监控功能、可靠性功能，结合分析的软件整理需求，并增加上电初始化相关设计，形成本软件的顶层应用功能需求。将各功能模块划分为若干个功能模块，各功能集可进行独立封装和定型设计，各任务通过对子功能块的调用完成各项功能的实现。主要包括 3 个中断和 6 个软件任务。

- 1) 505 中断服务程序：对应 505 中断，读取并处理通道累加数据，完成信号捕获跟踪与比特同步；
- 2) TIC 中断服务程序：对应 TIC 中断，完成 BIT 数据处理和帧同步、测量数据获取、开机时间累加，进行通道设置和快捕调度，进行 TIC 时间片处理，触发周期性任务；
- 3) 板间通信中断服务程序：对应板件通信中断，对板件通信指令或数据进行解析处理。

6 个软件任务，优先级从高到低依次分别为：

1) 初始化任务：用以执行程序入口模块，完成应用程序环境，初始化软件系统，程序上电加载、复位加载时运行一次；

2) 绝对定位解算任务：用以执行每秒进行一次的原始测量数据预处理、绝对定位解算、系统时间维护、电文帧解码等处理；通过控制信号处理相关器生成本地载波和伪码，对接收到的导航信号进行相关处理；控制快速捕获模块，对导航信号进行快速捕获；通过锁频环、锁相环、伪码码环，对捕获到的导航信号进行跟踪处理。对于采用扩频信号体制的导航信号，环路处理模块主要包含伪码码环和载波环两个环路。

3) 自主定轨任务: 利用原始观测量信息及轨道动力学信息进行实时自主定轨解算, 在滤波收敛后能输出满足导航定位性能的定轨结果^[11-12]。包括数据获取、几何学实时定轨、时间与坐标系统转换、动力学轨道积分、卡尔曼滤波定轨、动力学轨道内插与发布共六个模块, 完成从获取星载多模观测数据、动力学轨道积分、几何学单点定轨、卡尔曼滤波定轨和卫星轨道发布整个数据处理流程。

4) 数据组包任务: 用以执行每 200 ms 一次的数据组包任务, 根据通信协议, 完成测量数据、解算结果、软件运行状态、数据打包, 并通过板间通信接口发送给接口板;

5) 选星预报任务: 用以执行每 30 秒一次的导航星选星预报, 确定预报模式, 完成可视导航星的计算与筛选; 根据卫星自身的位置、速度与时间信息, 结合导航卫星的历书信息, 对导航卫星进行预报, 把即将进入天线视场的导航卫星置入捕获跟踪通道。正常定位状态时, 选星预报模块通过计算自身的位置速度信息与 BD2/GPS 导航星的位置速度间相对关系进行预报。当处于非定位状态时, 采用盲捕方式对导航信号进行处理。

6) 系统监控任务: 用以在空闲时执行软硬件系统状态监控, 包括堆栈指针、SRAM 状态、FPGA 校验状态等。

2.2 接口板电路设计

接口板主要完成整机与外部各用户接口的数据交互功能。对内完成导航信息处理数据的接收, 对外完成接收机所有用户要求的协议输出。具体功能如下:

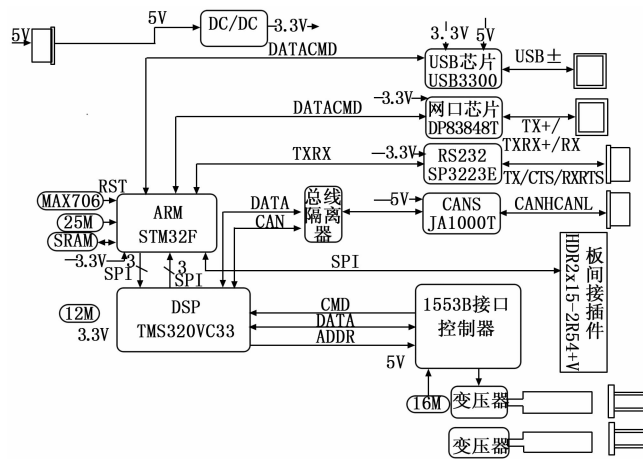


图 4 接口板设计框图

- 1) 通过内部通信接收导航板发送的定位、定轨数据;
- 2) 将测量定位数据按协议输出至外部各用户;
- 3) 接收外部用户设备发送的控制指令;
- 4) 将秒脉冲信号送至用户。

接口板 DSP 采用 TI 公司的 TMS320 系列浮点 DSP, 核工作电压 1.8 V, IO 工作电压 3.3 V, 主频达 75 MHz。外部总线宽度 32 bits (字访问模式), 寻址范围 16 M×32 bit。选用 S29AL032D 作为外挂 DSP 的 32 Mbits 的 FLASH 进行程序存储和加载。DSP 主要完成 ARM 与 CAN 和 1553B 总线的中转通信。ARM 采用 ST 公司的 STM32F207ZGT6,

工作电压为 3.3 V, 工作频率为 25 MHz。片上 1 Mbit 的 FLASH 和 128+4 Kbit 的 SRAM。ARM 的外围接口主要包括对 DSP 通信、SRAM 存储、看门狗电路、JTAG 下载电路、USB 总线接口、网络接口、USB、RS-232、RS-422 接口等。

接口板 DSP 程序设计:

接口软件包括内部接口模块、外部接口模块、数据组包模块组成, 主要完成数据对内和对外的交换功能: 根据协议完成与导航板软件的数据交互、通过网口/USB/RS232/RS422/CAN/1553B 总线与其他设备的数据交互及轨道接口软件内部各模块间的数据交互, 具体功能如下:

1) 接收导航板数据: 接收来自导航板软件的同步口数据, 数据内容包括定位测量数据、遥测数据、导航电文数据;

2) 向导航板发送数据: 有指令或者数据需要转往通道板时将该数据发往通道板;

3) 响应网口/USB/RS232/RS422/CAN/1553B 总线接收中断: 接收和响应来自网口/USB/RS232/RS422/CAN/1553B 总线的星上其他设备的数据;

4) 接收导航板的 T MARK 时间信息, 通过不同的电路接口对外输出。

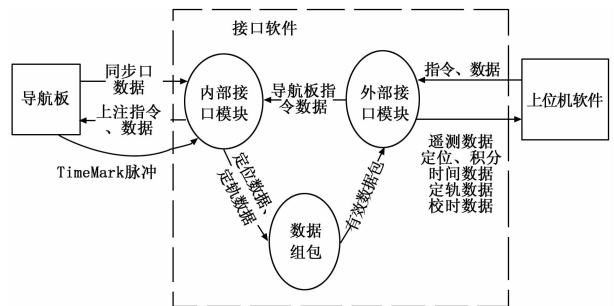


图 5 用户终端接口软件数据流图

3 测试验证

由于 GNSS 接收机要安装于卫星上完成高动态飞行的任务, 因此必须模拟其在高动态环境下的性能指标, 采用 GNSS 全频段信号源对多模卫星导航星载用户终端仿真平台进行实验室内的仿真测试, 测试多模卫星导航星载用户终端仿真平台的各项技术指标^[13]。在实验室内的仿真测试后进行外场静态实验, 静态环境测试采用外接 BD2/GPS 天线的方式将信号引入多模卫星导航星载终端仿真平台, 用于模拟星载 GNSS 产品研制期间接收机与天线的兼容性等性能指标, 在进行外场试验对仿真平台进行验证时, 在观测地点同时放置两台接收机, 一台为商业接收机, 一台为多模卫星导航星载用户终端仿真平台。通过对伪距、载波和多普勒观测数据进行对比分析, 可以对多模卫星导航星载用户终端仿真平台的性能指标进行评估和验证, 通过对两个观测数据进行处理, 得到定位结果、测速结果、定轨结果、载波相位和伪距测量结果, 通过比对或者与测站位置

信息进行对比, 对定位精度、定轨精度和测速精度指标进行评估^[14]。通过测试验证, 多模卫星导航星载用户终端仿真平台各项实测指标均满足表 1 中的各项指标要求。

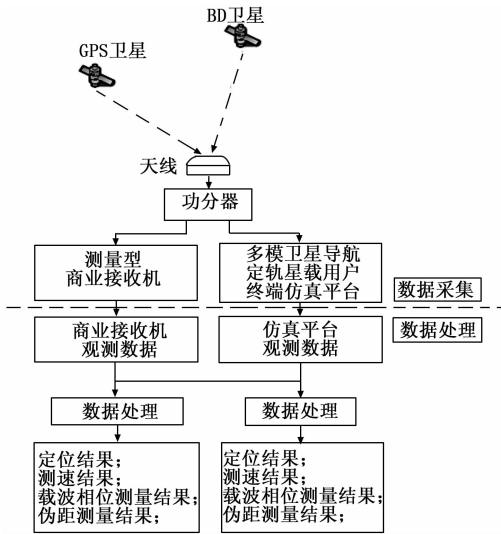


图 6 仿真平台外场实验验证图

4 结束语

本文设计了一种多模卫星导航星载终端仿真平台, 该仿真平台能够处理 GPS L1/L2、BD2 B1/B2/B3 等多频点信号。能够模拟星载导航设备在高动态条件下定位、定轨、授时的性能, 提供精密定轨所需要的验证数据。在地面用卫星导航星载终端仿真平台模拟各种星载导航设备, 提前开展仿真验证工作, 减少星载导航设备在轨飞行风险, 提高可靠性。该设备已经研制成功, 经过搭建测试环境, 对仿真平台进行功能测试, 对仿真平台数据进行了分析, 多模卫星导航星载终端仿真平台各项功能和性能指标均能满足研制要求。确认了仿真平台具备可在地面对星载多模导航

(上接第 234 页)

5 结论

本文通过对传统双机热备方案进行优化, 设计了一种多策略双机热备方法, 该方法通过一种精准定时装置实现心跳发送和时间同步, 以此完成交叉心跳侦测, 保证故障判断的准确性, 并借助数据库实现主备节点的 IP 双向校验, 以减少代码量实现了服务无缝切换, 保证了服务的高可用性以及内存资源的一致性。目前已经在多个省份的实时监控得到应用, 运行平稳。

参考文献:

[1] Q/GDW 1872.11-2013 国家电网通信管理系统规划设计 第 11 部分: 动力环境监控.

[2] 刘晓洁, 黄永佳. 基于 Linux 的双机热备系统的实现技术 [J]. 计算机应用研究, 2007, 24 (4): 255-257.

[3] 刘刚, 马威, 李晓勇. 基于多方决策机制的双机热备模型 [J]. 计算机工程与设计, 2014, 35 (9): 3061-3064.

[4] IETF. Virtual router redundancy protocol (VRRP) version 3

接收进行全面仿真和评估, 验证卫星精密定轨的实际能力, 具有较高的工程应用价值。

参考文献:

[1] 许继爽, 王诗奎, 杨鹤猛, 王兵. 高分辨率遥感卫星在应急监测领域的应用 [J]. 卫星应用, 2016 (3): 48-53.

[2] 唐新明, 谢俊峰. 高分辨率遥感卫星测绘关键技术研究综述 [A]. 中国卫星应用大会 [C]. 2011.

[3] 赵春梅, 唐新明. 基于星载 GPS 的资源三号卫星精密定轨 [J]. 宇航学报, 2013, 34 (9): 1202-1206.

[4] 李立言. 高动态 GNSS 信号处理及解算关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

[5] 李敏. 多模 GNSS 融合精密定轨理论及其应用研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2011.

[6] 王会芹. 基于 FPGA 的 BD2/GPS 双系统相关器的研制 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2014.

[7] 陈文江. 基于 FPGA 的北斗卫星导航系统接收机基带信号处理器设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015.

[8] 陈艳. 基于 FPGA 的 GPS 接收机相关器研制 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2012.

[9] 刘晓明, 张鹤, 吴皓威, 等. 高动态环境下长码扩频信号快捕算法 [J]. 电子与信息学报, 2016, 38 (6): 1398-1405.

[10] 王晓东. 基于 FPGA 的 GPS 接收机 16 通道快捕相关器设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010.

[11] 祖安然. BDS 多星定轨卡尔曼滤波算法研究 [D]. 解放军信息工程大学, 2015.

[12] 刘成, 朱淑珍, 梁广, 等. 基于扩展 Kalman 滤波算法实现定轨 [J]. 信息技术, 2016 (12): 58-60.

[13] 赵德功, 魏小丰. 一种星载 GPS 接收机设计及测试 [J]. 电子科技, 2016, 29 (9): 158-160.

[14] 刘宁, 刘希刚, 黄缙, 等. 一种星载测量型 GNSS 接收机地面验证和性能评测方法 [P]. 2013.

[5] IETF. Cisco Hot Standby Router Protocol (HSRP) [EB/OL]. <https://tools.ietf.org/html/rfc2281>, 2018.

[6] Linux-HA. Linux-HA's documentation [EB/OL]. http://linuxha.org/wiki/Main_Page, 2018.

[7] 张永立, 胡杰, 张根宝. Linux 集群心跳检测方法的研究与实现 [J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37 (6): 82-84.

[8] 贾长伟, 廖建, 彭健, 等. 基于心跳监测机制的中间件监控方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (11): 3654-3655.

[9] 关国栋, 滕飞, 杨燕. 基于心跳超时机制的 Hadoop 实时容错技术 [J]. 计算机应用, 2015, 35 (10): 2784-2788.

[10] 刘明锦. 一种虚拟化集群心跳算法 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (17): 110-113.

[11] 张水平, 李有峰, 童样, 等. 云数据中心心跳检测与故障评估 [J]. 计算机工程与设计, 2014 (10): 3386-3391.

[12] 文杰, 汪琳霞, 鄢锋. 心跳包技术应用于高可靠工业网络中的研究 [J]. 控制工程, 2017, 24 (5): 1048-1052.